



REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA
Tanindrazana - Fahafahana – Fandrosoana

MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE L'ELEVAGE ET DE LA PÊCHE



Collection BVPI/SCRiD/FOFIFA/TAFA

Document de travail n° 31

**Réduction par les SCV du ruissellement et de l'érosion sur les Hautes Terres
de Madagascar.**

Jean Marie Douzet, SCRiD, R N C Razafindramanana, Université d'Antananarivo, R. R. N. Remamy,
M. B. Rasoloniaina, V. Rakotoarisoa, M. H. Rakotoalibera, ESSA, T. R. Rakotonirainy, ISPM

2012

Résumé : une expérimentation a été mise en place en 2004 à Andranomanelatra afin de mesurer les ruissellements et érosions sous différents systèmes de gestion des sols dans une rotation bisannuelle à base de maïs associé en rotation avec du riz. 3 répétitions de 5 systèmes différents ont été mises en place, sur des parcelles de type Wischmeyer sur une pente de 10 à 13 %. Des mesures de ruissellement et de pertes en terre ont été effectuées, ainsi que toutes les mesures annexes pouvant aider à comprendre les déterminants de ces pertes en terre. Une thèse en collaboration avec le LRI et l'Université d'Antananarivo a permis d'analyser les pertes en C, N et P correspondant à ces érosions.

Les résultats montrent l'effet positif des systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal (SCV) pour la réduction du ruissellement et surtout de l'érosion. La couverture du sol par les débris végétaux ou la végétation (culture, couverture vive, adventices) semble être un des facteurs principaux de la réduction des pertes en terre. D'un point de vue qualitatif, les systèmes en SCV réduisent fortement les pertes en C, N et P, et permettent une augmentation du stock de C dans les sols. Les SCV permettent également d'améliorer l'infiltration de l'eau dans les sols, d'augmenter l'humidité résiduelle des sols en saison sèche, et de maintenir des densités de sol plus faibles pour l'horizon 0-5 cm. Au bout de quelques années, les rendements sont équivalents en SCV et en labour, et on ne note pas de différence significative entre les différents types de SCV ou de labour (avec ou sans exportation).

Mots clés : ruissellement, érosion, Hautes Terres, Madagascar, SCV

Introduction

Sur les Hautes Terres de Madagascar, la fragilité des sols et l'intensité des pluies font que les phénomènes d'érosion sont bien connus. La mise en culture des *tanety* (pentes) avec labour –le plus souvent manuel, à l'*angady* (sorte de bêche) -, avec peu d'utilisation d'intrants, entraîne une érosion hydrique accrue des versants et des pertes en sédiments qui se déposent dans les rizières en contre bas, pouvant à moyen terme causer l'ensablement des dispositifs irrigués et même entraîner à terme l'abandon de certains périmètres.

Dans cette région densément peuplée, l'agriculture reste l'activité principale. Le riz est essentiellement cultivé dans les rizières plus ou moins aménagées des fonds de vallée et de bas-fond. Les *tanety*, terrains non inondables, le plus souvent en pente, à la végétation naturelle généralement constituée de *bozaka* (*Aristida* sp.), étaient traditionnellement réservées à du pâturage extensif. Toutefois, devant la pression démographique, la pression foncière sur les rizières s'accroît rapidement, et le recours à la mise en culture des *tanety* est de plus en plus généralisé.

L'importance de la couverture du sol pour limiter les phénomènes de ruissellement et d'érosion hydrique le long de pentes cultivées est reconnue depuis longtemps. Les systèmes de culture en semis direct avec couverture permanente du sol (SCV), qui ont été mis au point pour Madagascar depuis quelques années par diverses institutions (ONG telles que TAFE, centres de recherche tels que FOFIFA, CIRAD), sont des systèmes de culture qui ne comportent pas de travail du sol : le sol reste couvert durant toute l'année par une plante en place (culture principale, culture de couverture en dérobée, culture de couverture permanente) et/ou des résidus de la culture précédente (couverture morte). Ces systèmes semblent donc particulièrement bien adaptés pour limiter le ruissellement et lutter contre l'érosion, entre autres avantages pour la durabilité des terres agricoles.

L'unité de recherche en partenariat « Systèmes de cultures et rizicultures durables » (URP SCRiD) est formée de chercheurs du FOFIFA, de l'Université d'Antananarivo et du CIRAD. Le défi majeur de développement auquel l'unité se propose de répondre porte sur l'augmentation durable de la production rizicole, par l'amélioration de la productivité et de la durabilité technique et socio-économique des systèmes pluviaux qui contribuent, dans plusieurs régions du pays, en complément des rizicultures aquatiques, à la sécurité alimentaire.

Méthodologie

Une étude sur le ruissellement et l'érosion a été menée à partir de 2004 pour mesurer sur une pente de 10 à 13 % les effets de différents systèmes de gestion des sols sous une rotation courante en milieu paysan dans la zone, riz pluvial // maïs + haricot. Pour cela, un dispositif a été mis en place sur un terrain en pente à Andranomanelatra, à une quinzaine de km au nord d'Antsirabe.

Milieu physique

Situation géographique : ce dispositif est situé sur les Hautes Terres malgaches, région d'altitude du centre de Madagascar ; dans la région du Vakinankaratra, et dans la commune d'Andranomanelatra, sur la nationale 7 à 15 km au nord est d'Antsirabe ; les coordonnées en sont 19°46'45" de latitude sud et 47°06'25" de longitude est, et l'altitude est de 1645 m. La zone est densément peuplée, 122 h.km⁻² (Rakotonirainy T R, 2007) ; l'activité principale est l'agriculture (riz, maïs, haricots, pommes de terre), les cultures fruitières et le petit élevage laitier (Rakotofiringa et al., 2007).

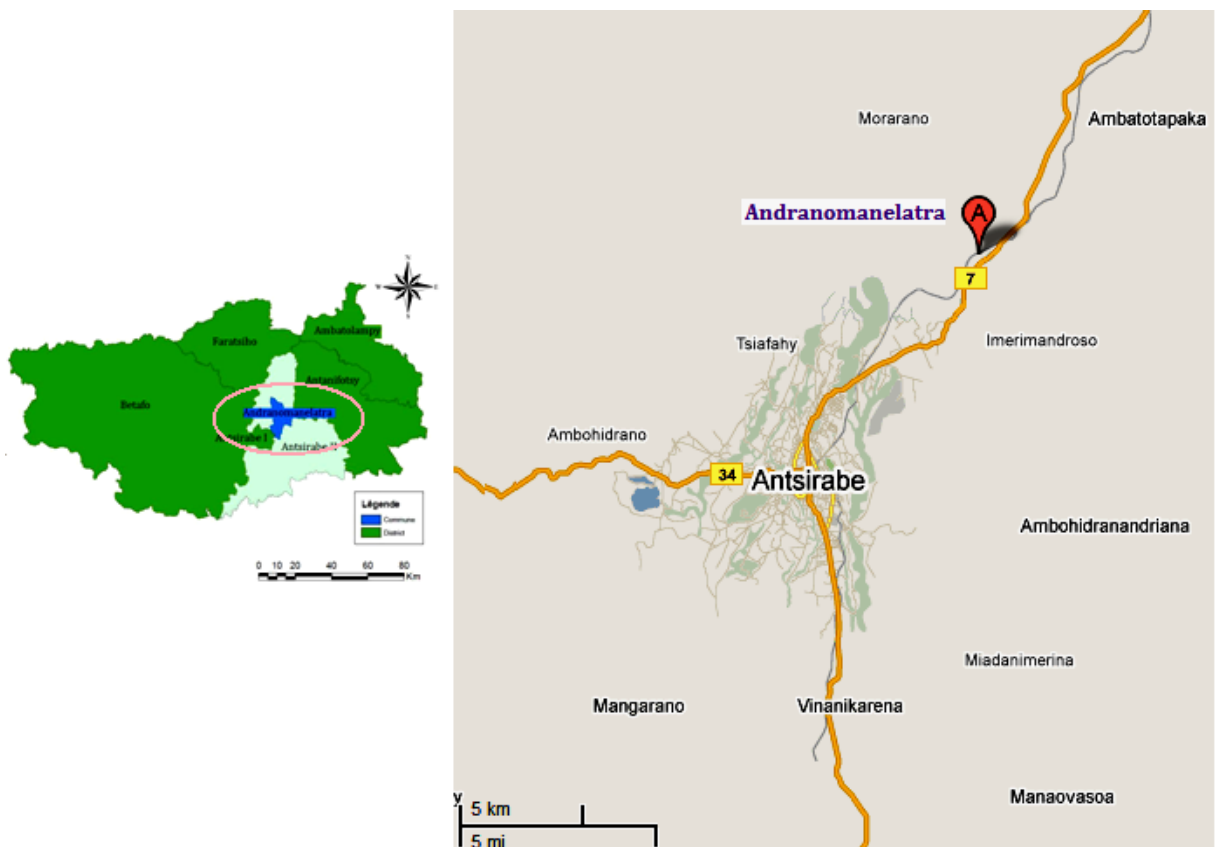


Figure 1 : Carte de localisation géographique du site d'étude à Andranomanelatra-Antsirabe.

Source : BD 200 FTM et 2010 Google-Données Cartographiques©2010-Europa-Technologies.

Climat : le climat est de type tropical d'altitude (ou subtropical humide avec un été doux - sub-tropical wet and mild summer- (Peel *et al.*, 2007)), avec 2 saisons bien marquées : l'hiver, de mai à septembre, saison froide et généralement sèche, avec des risques de gelées (jusqu'à -1,6 °C en juillet ou août) et des précipitations occultes possibles ; et l'été, saison humide et chaude, d'octobre à avril. La figure 2 montre la courbe ombrothermique de Gaussen correspondant à la période de l'étude (2004-2011). Pour la période considérée, les précipitations annuelles ont varié de 1051.1 à 1664.5 mm, avec une moyenne de 1405.0 mm ; les températures moyennes annuelles sont de l'ordre de 17 °C, les minimales de 10 °C et les maximales de 24 °C.

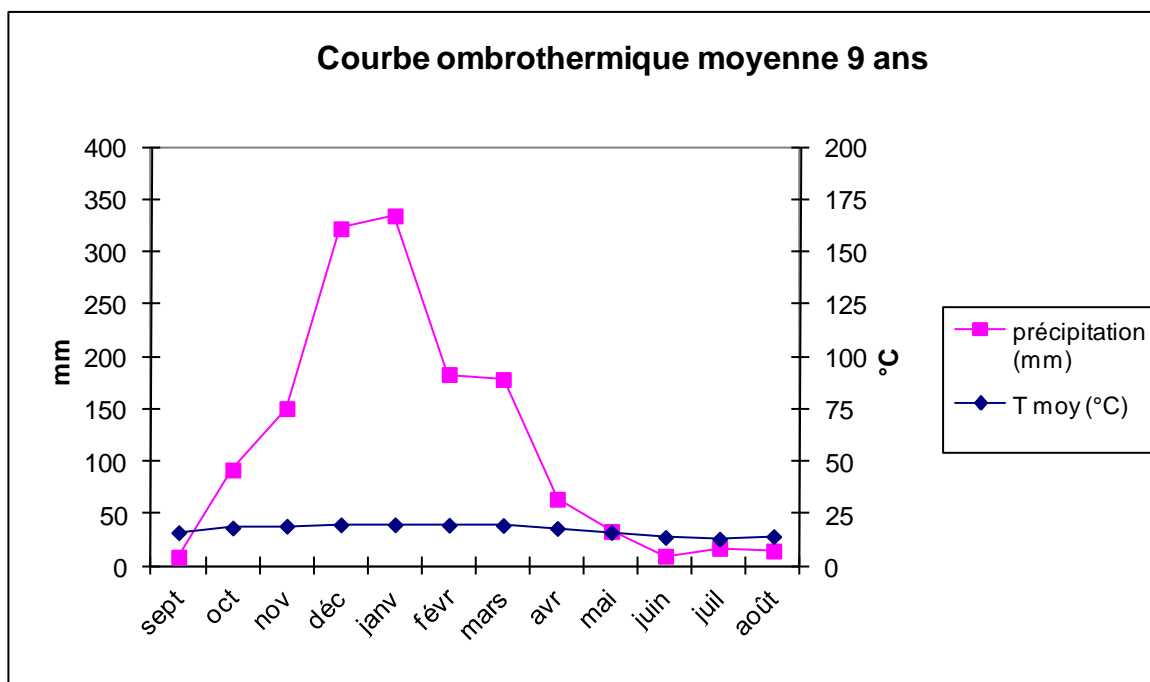


Figure 2 : courbe ombrothermique de Gaussen Andranomanelatra (2002-2011) ; station météo Cimel SCRiD.

Sol : les sols du dispositif sont classés en sol ferrallitique argileux à variante andique (clayey Andic Dystrustept) d'après Soil Survey Staff (2003), ou comme un Ferralsol selon la classification de la FAO (1998). Ils sont riches en argile (taux > 60 %), à pH acide (pH eau < 5), moyennement riches en matière organique mais pauvres en éléments minéraux, profonds et bien structurés, de densité apparente inférieure ou égale à 1 (voir tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques des sols d'Andranomanelatra (Douzet et al., 2010)

Profondeur	Argiles %	Limons %	Sables %	CEC cmol _c kg ⁻¹	pH eau	C tot mg g ⁻¹	N tot mg g ⁻¹	P ass Olsen mg kg ⁻¹
0-10	59.4	27.5	13.1	3.71	4.94	44.5	3.53	13.9
30-60	72.0	15.2	12.1	2.63	4.87	24.2	1.65	n.d.
90-120	70.7	15.4	13.9	1.11	5.18	5.20	0.50	n.d.

Dispositif

Un dispositif expérimental de mesure du ruissellement et de l'érosion a été mis en place en novembre 2004, sur une grande parcelle en pente de 10 à 13 % initialement en jachère depuis une dizaine d'années. La végétation était essentiellement constituée de graminées de type *Cynodon dactylon*. Les systèmes comparés sont à base de la rotation bisannuelle riz // maïs + haricot, une rotation assez fréquente dans le milieu (Rakotofiringa et al., 2007). On compare des systèmes avec labour conventionnel manuel (profondeur d'environ 25 cm) à l'angady (bêche à fer plat et étroit) à des systèmes en semis direct sur couverture végétale (SCV) pour lesquels les adventices sont contrôlées à l'herbicide avant semis de la culture. Sur labour, les résidus des cultures précédentes peuvent être soit enfouis, soit exportés avant labour. Sur les systèmes en SCV, les résidus des cultures précédentes sont laissés sur les parcelles, le semis étant effectué manuellement à travers ce mulch. Les systèmes S1 à S5 ont été installés au cours de 2 années : S1, S2 (labour) et S3 (SCV) en novembre 2004, S4 (labour) et S5 (SCV) en novembre 2005. Deux témoins ont également été installés en novembre 2005, en bordure du dispositif : un témoin sol nu toujours maintenu propre (noté Tp), et un témoin laissé en jachère, toujours enherbé (noté Te) (figure 3). Le travail du sol, la gestion des résidus de culture et la rotation des cultures pour les 7 systèmes sont détaillés au tableau 2. Le dispositif comprend 22 parcelles de 12 m de long (dans le sens de la pente) et 4 m de large, soit 4 répétitions pour chacun des systèmes S1 à S5, et 1 répétition pour les systèmes témoins (Tp et Te). 3 parcelles sur les 4 répétitions des systèmes S1 à S5 ont été divisées en 2 parties permettant d'équiper des ½ parcelles dites « lots d'érosion » (type parcelle de Wischmeyer) pour l'étude de l'érosion et du ruissellement (figure 3). Leurs dimensions sont de 12 m de long sur 1,8 m de large soit 21,6 m² de superficie contrôlée. Le côté supérieur et les deux côtés latéraux sont bordés de tôles de 20 cm de haut enfoncées de 10 cm dans le sol, et, en aval, un déversoir en tôle permet de rassembler les eaux de ruissellement et de les diriger vers deux fûts collecteurs de 200 litres.

Par ailleurs, des « cadres d'érosion » d'une surface de 1 m², à partir desquels on recueille l'eau ruisselée dans un bidon de 20 litres, ont été installés sur 2 parcelles S1 et 2 parcelles S3 (figure 3). Toutefois, les résultats de ces « microlots », qui corroborent ceux des lots, ne seront pas présentés dans ce document.

Tableau 2 : Description des différents traitements comparés

	Campagne 2004-05			Campagne 2005-06			Campagnes suivantes		
	Labour	Exportation résidus	Culture	Labour	Exportation résidus	Culture	Labour	Exportation résidus	Culture
S1	oui	non	maïs+haricot	oui	non	riz	oui	oui	maïs+haricot//riz
S2	oui	non	maïs+haricot	non	non	riz	non	non	maïs+haricot//riz
S3	non	non	maïs+haricot	non	non	riz	non	non	maïs+haricot//riz
S4	-	-	jachère	oui	non	riz	oui	non	maïs+haricot//riz
S5	-	-	jachère	non	non	riz	non	non	maïs+brach ¹ //riz
Tp	-	-	jachère	oui	oui	-	oui	oui	-
Te	-	-	jachère	non	non	jachère	non	non	jachère

¹ : *Brachiaria ruziziensis*, installation par boutures en décembre

Les parcelles sont menées selon des itinéraires comparables aux itinéraires techniques les plus communs en milieu paysan : conduite entièrement manuelle, semis au poquet,

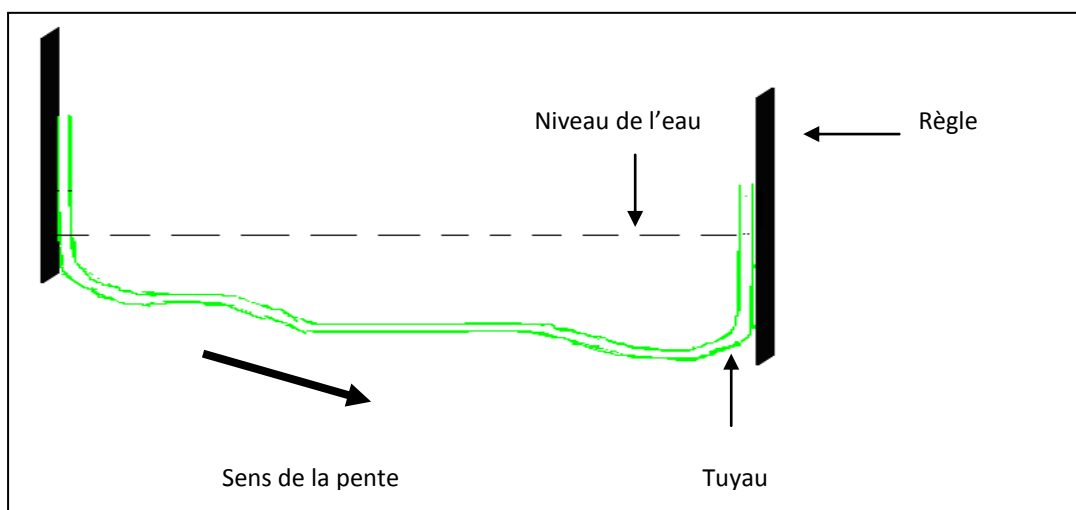


Figure 4 : Matériel de mesure de la pente (d'après Rakotoarisoa, 2006)

Climat (pluies) : la station automatique Cimel, située en bordure du dispositif, enregistre les pluies quotidiennement (hauteur, heures, durée, intensité maximale (mm/h) en 6 minutes consécutives), ainsi que les autres données quotidiennes (température de l'air, humidité de l'air, vitesse du vent, rayonnement).

Ruissellement : Les eaux de ruissellement sont recueillies dans deux fûts successifs pour chaque parcelle de ruissellement : le premier fût est équipé d'un partiteur qui fait qu'en cas de débordement, 1/5^{ème} de l'eau débordée passe dans le second fût. La hauteur d'eau est mesurée dans les fûts après chaque événement pluvieux.

Erosion : Après chaque événement pluvieux ayant donné suite à un ruissellement, on prélève, après homogénéisation manuelle, dans chaque fût 2 échantillons de 1.5 l, représentatifs de la solution ruisselée. Ces échantillons sont filtrés sur un papier filtre de porosité 0.45 mm et le filtre de l'un des échantillons est passé à l'étuve (24 heures à 105 °C) afin de déterminer la masse de charge solide entraînée par les eaux de ruissellement, tandis que l'autre filtre est séché au frais à l'air libre afin de pouvoir procéder à d'éventuelles analyses ultérieures.

Mesures qualitatives : on a analysé les échantillons séchés à l'air et regroupés par campagne ; ainsi, les éléments C, N et P totaux ont été mesurés par spectroscopie en moyen infra rouge, ou MIRS.

Taux de couverture : Des mesures du taux de recouvrement des parcelles ont été effectuées vers le 15 janvier de chaque campagne. Pour ce faire, un cadre de 1.1 m², sur lequel sont tendus des fils se croisant tous les 10 cm, a été utilisé. Cette grille est disposée horizontalement au dessus de la parcelle, et la nature de ce qui se trouve au point situé à la verticale de chaque intersection est notée (sol nu, résidus de différentes natures, plante vivante cultivée ou non). Deux mesures ont été effectuées par parcelle.

Infiltration : La vitesse d'infiltration en surface a été mesurée selon la méthode « Beerkan » (de Condappa, 2000; Findeling, 2001) à partir de cylindres de 30 cm de diamètre et de plusieurs lames d'eau de 1 cm de hauteur à chaque fois, jusqu'à stabilisation de la vitesse d'infiltration de la lame d'eau. 4 répétitions ont été effectuées en décembre 2004, 3 en janvier 2007, et une campagne complète à la saison sèche en septembre 2011.

Dans la pratique, on utilise des cylindres de diamètre de l'ordre de 30 cm, dans lesquels on versera une hauteur de 1 cm correspondant à un volume de 700 ml environ. On les enfonce superficiellement (0,5-1 cm), doucement et de façon régulière et bien horizontale afin de ne pas perturber la porosité du sol. Cette opération est effectuée à la main ou à l'aide d'une massette. On recommande de préparer une boue visqueuse avec le sol in situ, que l'on étendra à l'extérieur du cylindre afin de favoriser l'étanchéité latérale du dispositif.

Le protocole est le suivant : on verse le volume d'eau connu nécessaire dans le cylindre sur une feuille de plastique afin d'éviter toute perturbation de la surface du sol, de façon à créer une lame d'eau à la surface du sol de 1 cm, en déclenchant le chronomètre ; on retire tout de suite le film plastique ; on se prépare à verser un nouveau volume d'eau identique dès que la lame d'eau disparaîtra ; on note le temps de disparition de la lame d'eau dans le cylindre ; dès la disparition d'une lame d'eau, on ré-applique une feuille plastique pour protéger l'état de surface du sol, on reverse une lame d'eau de 1 cm, on note le temps et on retire la feuille plastique. Tout cela doit se faire rapidement, en 2 à 3 secondes maximum ; on répète l'ensemble des mesures 6 à 8 fois afin d'obtenir 6 à 8 points d'infiltration cumulée.

La charge hydraulique n'est pas constante : elle varie de 1 cm (versement du volume d'eau) et 0 cm (disparition de la lame d'eau). Cette variation étant faible, on la considérera constante et on pourra la prendre nulle dans le traitement des données.

En parallèle, on fait des mesures à côté du cylindre de densités apparentes et d'humidité initiale, sur 0-5 cm (utilisation de cylindres de 230 cm²). De même, les teneurs en eau à saturation seront mesurées, au centre de chaque cylindre, après mesure de l'infiltration, par prélèvement à la tarière d'un échantillon 0-5 cm et un échantillon 5-10 cm, pesée et séchage à l'étuve avant pesée de nouveau (Rakotonirainy, 2007).

Rendements (grain et biomasse aérienne) : les productions sont évaluées chaque année, par parcelle ; pour le riz, on récolte les parcelles entières moins 2 lignes de bordure tout autour ; on récolte, pèse (grain et paille) et on passe un échantillon à l'étuve (72 h à 60 °C) afin d'avoir des rendements matière sèche ; pour les autres spéculations (maïs, haricot, *brachiaria*), on récolte et pèse les parcelles entières avant de prendre des échantillons à sécher pour la matière sèche (grains et pailles également).

Principaux résultats

Pentes : les pentes des lots ont été mesurées à plusieurs reprises, les résultats restant très peu variables d'une fois sur l'autre ; les pentes vont de 9.5 % à 12.6 %, avec une moyenne générale de 11.3 %, et un écart type de 1 %.

Pluies : les précipitations durant la période de l'expérimentation sont présentées dans les figures 5 et 6 : la pluviométrie annuelle (mesurée de septembre à août, ce qui correspond à une campagne agricole) a varié de 1051,1 mm (2009-10) à 1664.5 mm (2004-05), avec une moyenne annuelle de 1373.2 mm. Les pluies commencent en octobre ou novembre, pour se terminer en mars ou avril. Les mois les plus pluvieux sont généralement ceux de décembre ou janvier, selon les années. Les événements exceptionnels (voir tableau 3) peuvent arriver durant les mois de novembre à avril (pluie journalière > 50 mm, intensité > 100 mm.h⁻¹) ; ces événements sont généralement responsables de forts ruissellements et pertes en terre, surtout quand ils sont situés en début de campagne, quand les sols ne sont pas encore couverts par la végétation.

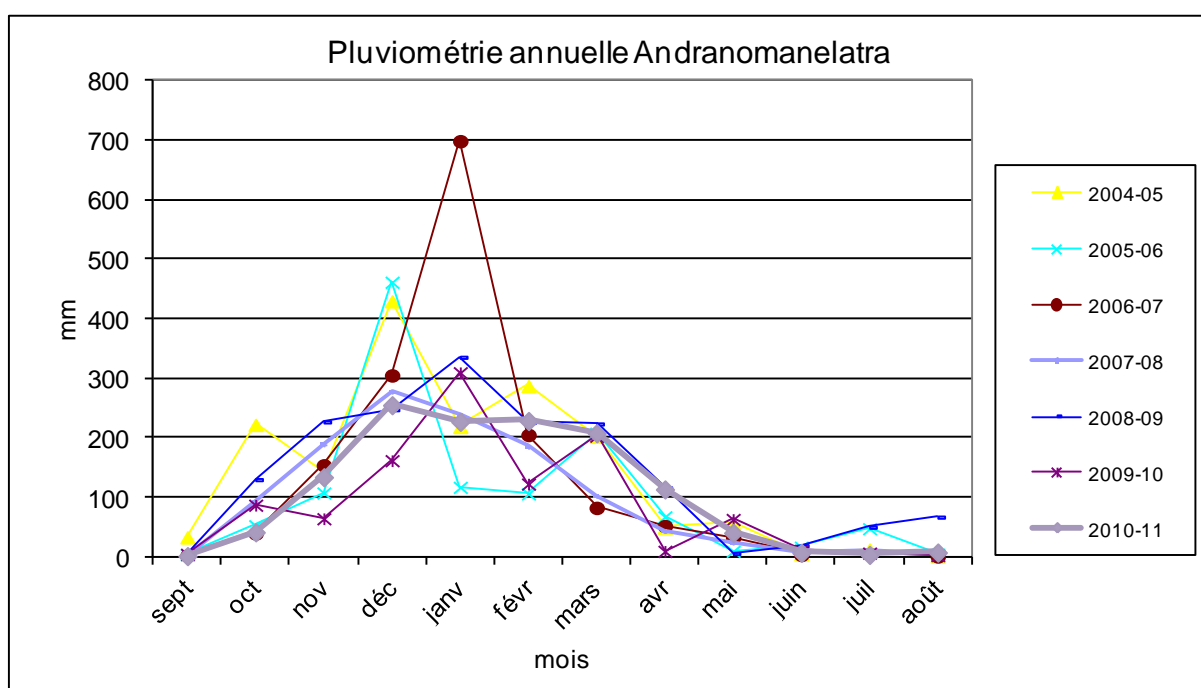


Figure 5 : Pluviométrie mensuelle de la station d'Andranomanelatra pour les 7 campagnes de la période 2004-2011

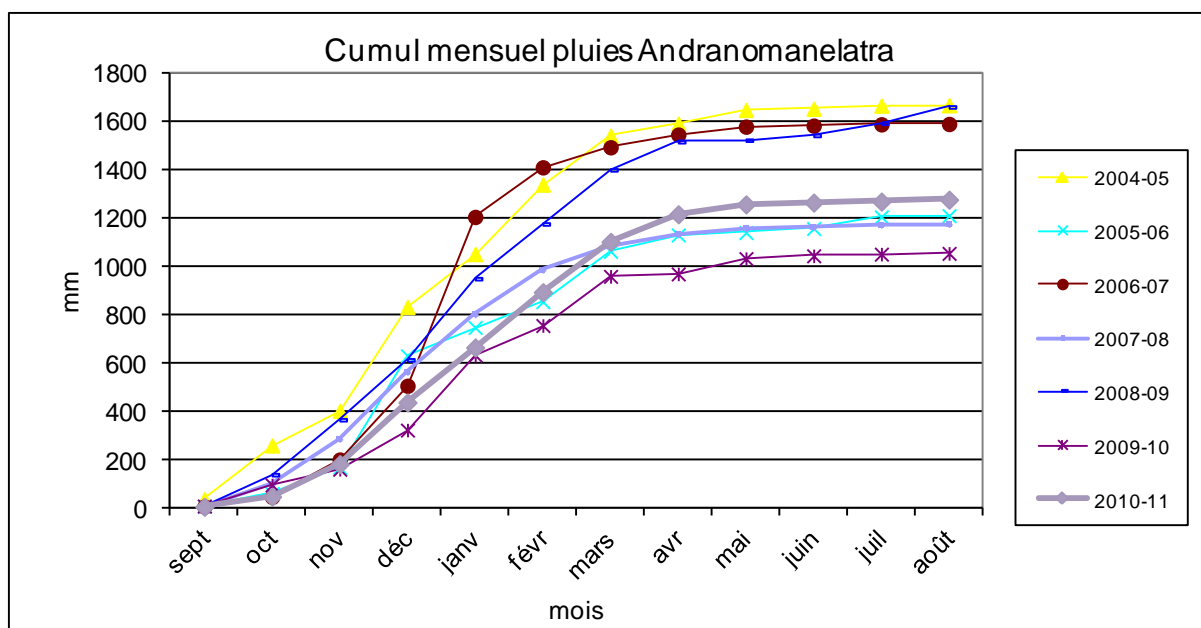


Figure 6 : Cumul mensuel des pluies de la station d'Andranomanelatra pour les 7 campagnes de la période 2004-11

Tableau 3 : événements pluvieux exceptionnels durant la période 2004/11

Campagne	Nb événements	novembre	décembre	janvier	février	mars	Avril	Total
2004-05	Pluie>50 mm	-	2	-	1	-	-	3
	Intensité>100	-	1	1	1	-	-	3
2005-06	Pluie>50 mm	-	1	-	1	2	-	4
	Intensité>100	-	3	-	-	1	1	5
2006-07	Pluie>50 mm	-	1	2	-	-	-	3
	Intensité>100	1	-	-	-	-	-	1
2007-08	Pluie>50 mm	-	1	-	1	-	-	2
	Intensité>100	1	-	-	-	-	-	1
2008-09	Pluie>50 mm	-	1	-	-	1	-	2
	Intensité>100	-	1	1	1	1	-	4
2009-10	Pluie>50 mm	-	-	1	-	1	-	2
	Intensité>100	-	-	2	-	-	-	2
2010-11	Pluie>50 mm	-	1	-	-	-	1	2
	Intensité>100	-	2	1	-	1	1	5

Calendriers cultureux

Les semis ont été effectués durant la 1^{ère} décade de novembre pour le riz, et la 1^{ère} décade de décembre pour le maïs + haricot ; les brachiaria sont installés par bouture autour du 20 décembre (voir tableau 4). Généralement, un à deux sarclages manuels ont été effectués. Les récoltes ont lieu en avril ou mai pour le riz, en mars pour les haricots et en fin mai début juin pour le maïs.

Tableau 4 : dates de semis et récoltes des cultures durant les 7 campagnes d'expérimentation

Campagne	Culture	Semis	Bouturage (brachiaria)	Récolte
2004-05	Haricot	09/12/04		30/03/05
	Maïs			25/05/05
2005-06	Riz	10/11/05		16/05/06
2006-07	Haricot	24/11/06	22/12/06	06/03/07
	Maïs			06/06/07
2007-08	Riz	06/11/07		28/04/08
2008-09	Haricot	03/12/08	18/12/08	11/03/09
	Maïs			08/06/09
2009-10	Riz	03/11/09		13/04/10
2010-11	Haricot	01/12/10	21/12/10	10/03/11
	Maïs			09/06/11

Ruissellement : les taux de ruissellement restent relativement bas, très supérieurs en labour par rapport aux SCV. Selon les campagnes, les ruissellements annuels vont de 43 à 188 mm en labour (moyenne de 90 mm), et jusqu'à 228 mm sur le témoin toujours propre ; par contre, en SCV, les ruissellements annuels varient de 9 à 26 mm, avec une moyenne de 17 mm. Ceci donne des taux de ruissellement allant de 0.9 à 2 % pour les SCV (moyenne 1.4 %) et, pour les labours, de 3.2 à 11.6 % (et jusqu'à 18.8 % pour le témoin toujours propre), avec une moyenne de 7.4 %. Les résultats par année sont présentés dans les tableaux 5 et 6.

Tableau 5 : cumuls annuels des ruissellements pour les 7 campagnes de mesure (mm)

Gestion	Système	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11		Moyenne
Lb exp	S1	43,61	84,43	64,56	79,12	187,72	96,91	96,20		93,22
Lb/SCV	S2	42,74	14,60	17,93	12,15	26,22	18,35	18,35		17,93
SCV	S3	19,23	8,51	13,56	9,91	24,24	16,81	19,28		15,94
Lb rest	S4		80,05	48,57	79,62	162,26	104,94	89,96		94,23
SCV brach	S5		13,89	21,04	12,80	22,54	16,71	15,76		17,12
Lb	Tp		105,47	227,84	123,57	285,27	151,26	224,50		186,32
SCV	Te		25,69	22,43	16,59	26,70	20,41	25,28		22,85
pluie campagne		1177	1069,50	1540,00	1059,00	1520,00	904,40	1216,50		1212,34
moy Lb		43,18	82,24	56,56	79,37	174,99	100,93	93,08		90,05
moy SCV		19,23	12,33	17,51	11,62	24,33	17,29	17,80		17,16

Tableau 6 : taux annuels de ruissellement (en %) pour les 7 campagnes de mesure

Gestion	Système	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11		Moyenne
Lb exp	S1	3,71	7,89	4,19	7,47	12,35	10,72	7,91		7,69
Lb/SCV	S2	3,63	1,37	1,16	1,15	1,72	2,03	1,51		1,48
SCV	S3	1,63	0,80	0,88	0,94	1,59	1,86	1,59		1,31
Lb rest	S4		7,49	3,15	7,52	10,67	11,60	7,40		7,77
SCV brach	S5		1,30	1,37	1,21	1,48	1,85	1,30		1,41
Lb	Tp		9,86	14,79	11,67	18,77	16,73	18,45		15,37
SCV	Te		2,40	1,46	1,57	1,76	2,26	2,08		1,88
moy Lb		3,67	7,69	3,67	7,50	11,51	11,16	7,65		7,43
moy SCV		1,63	1,15	1,14	1,10	1,60	1,91	1,46		1,42

Erosion : Les pertes en terre suivent les mêmes tendances que les ruissellements, mais les différences entre systèmes sont plus importantes (tableau 7). Pour une campagne, on mesure ainsi de 1.1 à 15.3 t/ha pour les systèmes en labour, contre 0.1 à 0.4 t/ha pour les systèmes en SCV ; alors que le témoin toujours enherbé perd moins de 100 kg/ha par an, le

témoin toujours propre subit des pertes en terre allant de 11.4 à 37.8 t/ha selon les campagnes.

Tableau 7 : cumuls annuels des pertes en terre sur 7 campagnes de mesure (t/ha)

		04-05	05-06	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11	Moyenne
Lb exp	S1	21,40	9,58	2,70	3,37	15,29	5,05	6,91	9,18
Lb/SCV	S2	27,23	0,19	0,12	0,13	0,28	0,13	0,06	0,15
SCV	S3	0,43	0,07	0,12	0,12	0,20	0,08	0,06	0,15
Lb rest	S4		9,44	1,06	4,09	15,25	6,78	5,80	7,07
SCV brach	S5		0,08	0,06	0,07	0,10	0,10	0,06	0,08
Lb	Tp		14,85	23,78	11,40	37,81	13,63	28,51	21,66
SCV	Te		0,08	0,04	0,02	0,03	0,01	0,03	0,03
pluie campagne		1177	1069,50	1540,00	1059,00	1520,00	904,40	1216,50	1212,34

Les cumuls sur 7 ans d'expérimentation sont indiqués dans la figure 7. On note des pertes en terre allant de 200 kg sur le témoin toujours enherbé à 130 t/ha pour le témoin toujours propre, tandis que les labours vont de 42 à 64 t/ha et les SCV de 0.5 à 1 t/ha. Rappelons que 1 t/ha correspond à 0.1 mm de couche de sol, avec une densité du sol de 1 : les labours ont donc perdu de 4 à 6 mm de sol en 7 ans.

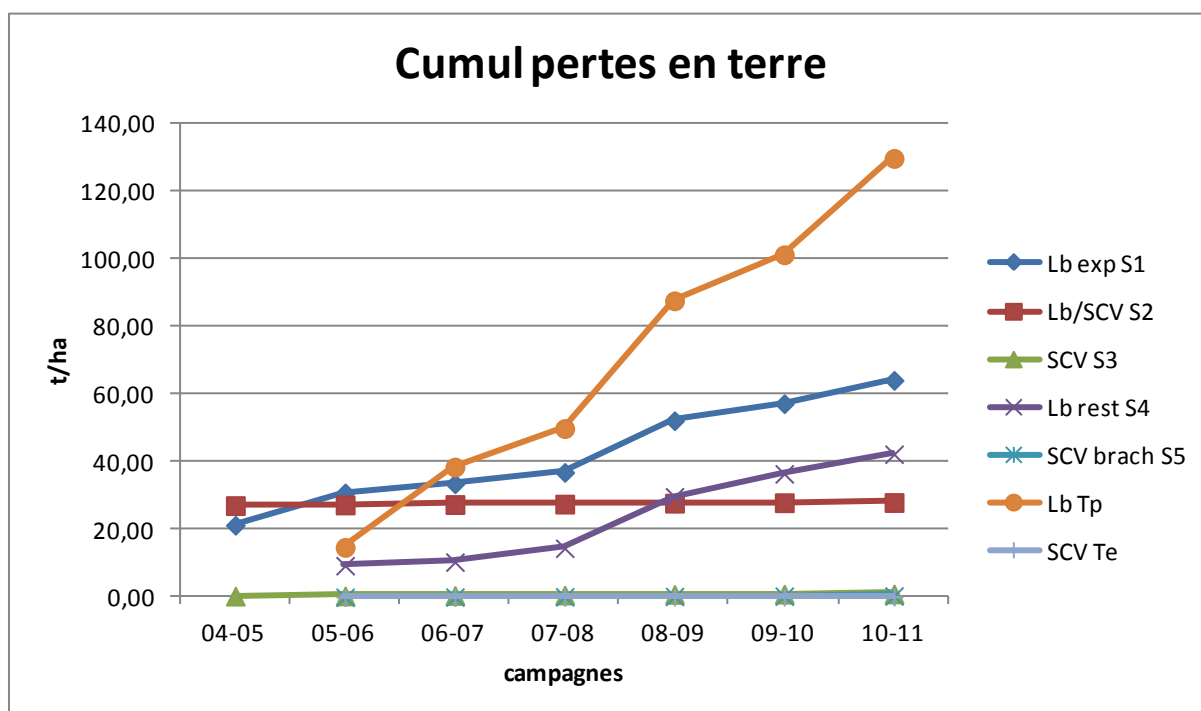


Figure 7 : cumul des pertes en terre au cours des 7 campagnes de mesure.

Qualitativement, les résultats que nous allons présenter en résumé sont tirés de la thèse de Norosoa Christine (Razafindramanana, 2011). En moyenne, sur 4 campagnes (2005-06 à 2008-09), les pertes en C par les sédiments varient de 335 kg C /ha /an pour les labours à 6 kg C /ha /an pour les SCV. En N, les pertes sont respectivement de 25 à 0.6 kg N /ha /an, et en P les pertes sont de 6.6 à 0.1 kg P /ha /an (voir tableau 8). Les stocks de C augmenteraient de 0.6 à 1 t/ha/an avec les SCV, alors qu'ils resteraient constants avec labour (Razafindramanana, 2011). Ces résultats sont proches de ceux obtenus par Razafimbelo et al. (2006).

Tableau 8 : Carbone érodé, pertes en azote total et en phosphore total sur tous les systèmes étudiés, durant la période d'expérimentation.

MDG	2005-06	2006-07	2007-08	2008-09	Moyenne
Carbone érodé, exprimé en Kg C.ha⁻¹.an⁻¹					
LAB-exp	341,0 ± 65,7 C c	44,1 ± 19,6 C a	176,3 ± 16,3 B b	769,6 ± 39 B d	332,7 ± 315,5 C
LAB-enf	396,7 ± 74,2 C c	61,5 ± 18,1 C a	158,4 ± 44,1 B b	737,2 ± 47,9 B d	338,5 ± 300,8 C
LAB-SCV	7,5 ± 0,9 B a	5,9 ± 0,7 B a	7,5 ± 1 A a	11,1 ± 5,6 A a	8,0 ± 2,2 B
SCV-morte	3,5 ± 1 A a	3,5 ± 0,7 A a	8,0 ± 1,5 A b	10,9 ± 2,7 A b	6,5 ± 3,6 AB
SCV-vivante	4,2 ± 1 A a	3,3 ± 0,3 A a	5,2 ± 1,6 A a	5,7 ± 2,5 A a	4,6 ± 1,1 A
Pertes en azote total, exprimée en Kg N.ha⁻¹.an⁻¹					
LAB-exp	29,3 ± 3,6 C c	3,7 ± 2,2 C a	12,3 ± 1,7 B b	54,5 ± 1,6 B d	25,0 ± 22,4 C
LAB-enf	35,1 ± 7,8 C c	4,9 ± 1,3 C a	13,1 ± 3,7 B b	52,7 ± 11 B d	26,4 ± 21,7 C
LAB-SCV	0,7 ± 0,09 B ab	0,5 ± 0,08 B a	0,7 ± 0,4 A b	0,8 ± 0,3 A b	0,7 ± 0,1 B
SCV-morte	0,4 ± 0,1 A a	0,3 ± 0,1 A a	0,7 ± 0,6 A a	0,8 ± 0,4 A a	0,6 ± 0,3 AB
SCV-vivante	0,3 ± 0,1 A a	0,3 ± 0,02 A a	0,5 ± 0,3 A a	0,4 ± 0,3 A a	0,4 ± 0,1 A
Pertes en phosphore total, exprimée en Kg P.ha⁻¹.an⁻¹					
LAB-exp	5,1 ± 3,2 C c	1,0 ± 0,5 B a	3,3 ± 0,6 B b	17,5 ± 0,4 B d	6,7 ± 7,4 B
LAB-enf	5,7 ± 3,2 C c	1,2 ± 0,2 B a	3,1 ± 1,1 B b	16,1 ± 3,6 B d	6,5 ± 6,6 B
LAB-SCV	0,2 ± 0,04 B b	0,1 ± 0,02 A a	0,1 ± 0,04 A a	0,3 ± 0,1 A b	0,2 ± 0,1 A
SCV-morte	0,04 ± 0,03 A b	0,1 ± 0,03 A a	0,1 ± 0,02 A a	0,3 ± 0,1 A c	0,1 ± 0,1 A
SCV-vivante	0,1 ± 0,03 A a	0,1 ± 0,01 A a	0,1 ± 0,08 A a	0,2 ± 0,1 A a	0,1 ± 0,04 A

MDG : mode de gestion

Moyennes ± écart-type (n=3).

Les lettres minuscules (a, b, c) se rapportent aux différences entre années pour un traitement, les lettres majuscules (A, B, C) aux différences entre traitements pour une année, une lettre différente indique une absence de différence significative au seuil de 5% d'après le test de Tukey.

Taux de couverture : Sur les trois premières années d'études, nous avons pu effectuer des mesures des taux de recouvrement du sol au 15 janvier (voir tableau 9) : ces taux de recouvrement sont très différents selon les campagnes agricoles. Ceci est dû à la fois aux dates de semis des cultures qui sont différentes, et aux cultures qui se mettent en place plus ou moins vite.

Tableau 9 : comparaison entre les systèmes au 15/01, pour les 3 premières campagnes

Campagne	Culture	Date semis	Pluie jusqu'au 15/01 (mm)		Labour	SCV	Student
2004-05	Maïs + haricot	09/12/04	538.0	Taux de recouvrement au 15/01 (%)	25	75	
				Ruissellement cumulé au 15/01 (mm)	32	10	S
				Ruissellement de la campagne (mm)	43	19	S
				Turbidité campagne (g/l)	55	2.5	S
				Erosion cumulée au 15/01 (t ha ⁻¹)	24	0.4	S
				Erosion de la campagne (t ha ⁻¹)	24	0.4	S
2005-06	Riz	10/11/05	614.5	Taux de recouvrement au 15/01 (%)	38	89	
				Ruissellement cumulé au 15/01 (mm)	70	8	S
				Ruissellement de la campagne (mm)	82	12	S
				Turbidité campagne (g/l)	11	0.9	S
				Erosion cumulée au 15/01 (t ha ⁻¹)	9	0.1	S
				Erosion de la campagne (t ha ⁻¹)	10	0.1	S
2006-07	Maïs + haricot	24/11/06	902.0	Taux de recouvrement au 15/01 (%)	65	97	
				Ruissellement cumulé au 15/01 (mm)	41	12	S
				Ruissellement de la campagne (mm)	57	18	S
				Turbidité campagne (g/l)	3	0.5	S
				Erosion cumulée au 15/01 (t ha ⁻¹)	2	0.1	S
				Erosion de la campagne (t ha ⁻¹)	2	0.1	S

Student : S : moyennes significativement différentes à 0.05 (test de Student) ; NS : moyennes non différentes significativement.

On constate ainsi que l'érosion est très négativement corrélée au taux de recouvrement du sol au 15 janvier (voir figure 8). L'érosion est la plus forte pour la campagne 2004-05, où le semis avait été effectué très tardivement, laissant le sol préparé et donc peu protégé au moment des plus grandes précipitations (décembre et janvier). Par contre, les effets relatifs sont moins importants pour le ruissellement, puisque celui-ci dépend avant tout de l'intensité et du volume des pluies, indépendants du recouvrement, et de la capacité du sol à infiltrer l'eau.

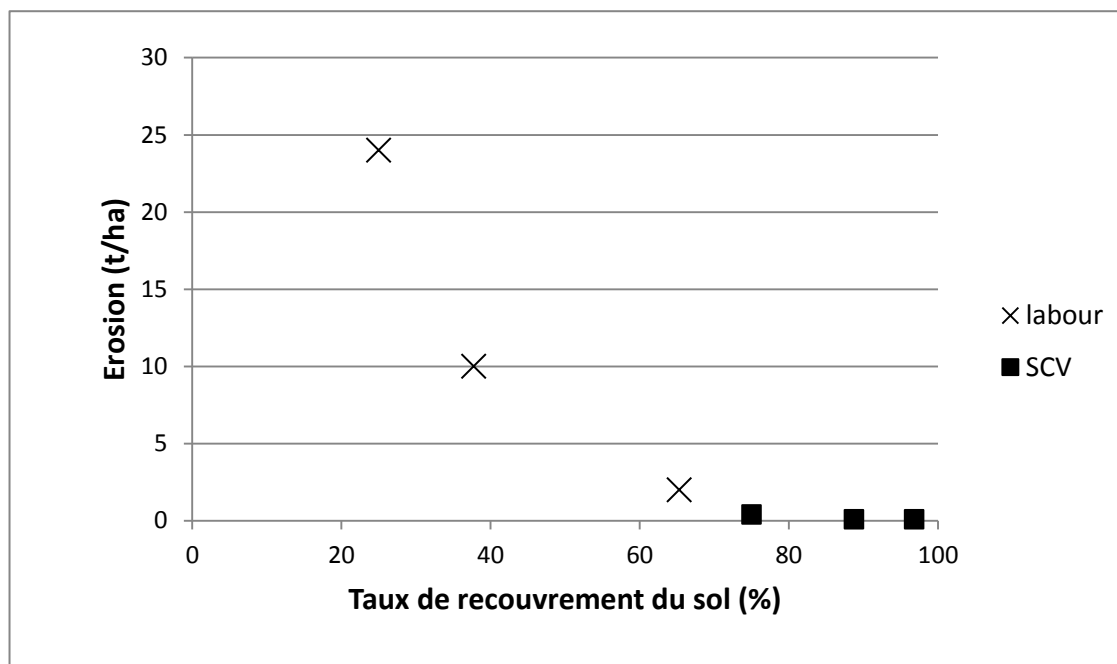


Figure 8 : Relation érosion et taux de recouvrement moyen sur les 3 1^{ère} campagnes, au 15 janvier

De même, l'influence du recouvrement du sol sur la turbidité des eaux de ruissellement est très importante : nous prendrons pour exemple les 2 campagnes 2005-06 (culture de riz) et 2006-07 (culture de maïs + haricot). Même si les turbidités évoluent entre 0,4 et 51 g l⁻¹ sur labour contre 0,1 et 15 g l⁻¹ sur SCV, elles sont plus importantes, en moyenne annuelle, sur le témoin Tp. Ainsi, si la turbidité diminue avec le temps au cours d'une campagne sur les parcelles cultivées en labour, du fait du recouvrement progressif des parcelles par la culture, elle ne semble pas diminuer avec le temps sur la parcelle Tp. Sur cette parcelle, elle est plus liée à l'érosivité des événements pluvieux, et dépendra donc de la hauteur d'eau, de l'intensité maximale et de l'eau dans le sol (donc des pluies tombées antérieurement). Ainsi, en 2005-06, avec des intensités de pluie dépassant 100 mm h⁻¹, en début de campagne, sur sol humide, on atteint des turbidités de presque 50 g l⁻¹ sur Tp, et de plus de 25 g l⁻¹ sur labour cultivé, alors qu'en fin de campagne, sur sol sec, les turbidités descendent à 13 g l⁻¹ sur Tp, et à moins de 2 g l⁻¹ sur labour cultivé (figure 9 a). En 2006-07, les intensités maximales sont moins importantes (une seule fois supérieure à 100 mm h⁻¹ ; cette intensité étant isolée en début de campagne sur sol sec, les turbidités résultantes sont de 25 g l⁻¹ au maximum sur un traitement labouré). Les turbidités sur Tp deviennent supérieures à toutes les autres dès décembre, et atteignent des maxima de presque 50 g l⁻¹ avec une série de pluies quotidiennes qui ont totalement saturé le sol. Alors que les turbidités des parcelles labourées restent inférieures à 3 g l⁻¹ à partir de fin décembre, les turbidités atteignent encore 28 g l⁻¹ en fin mars et 18 g l⁻¹ en fin avril (figure 9 b).

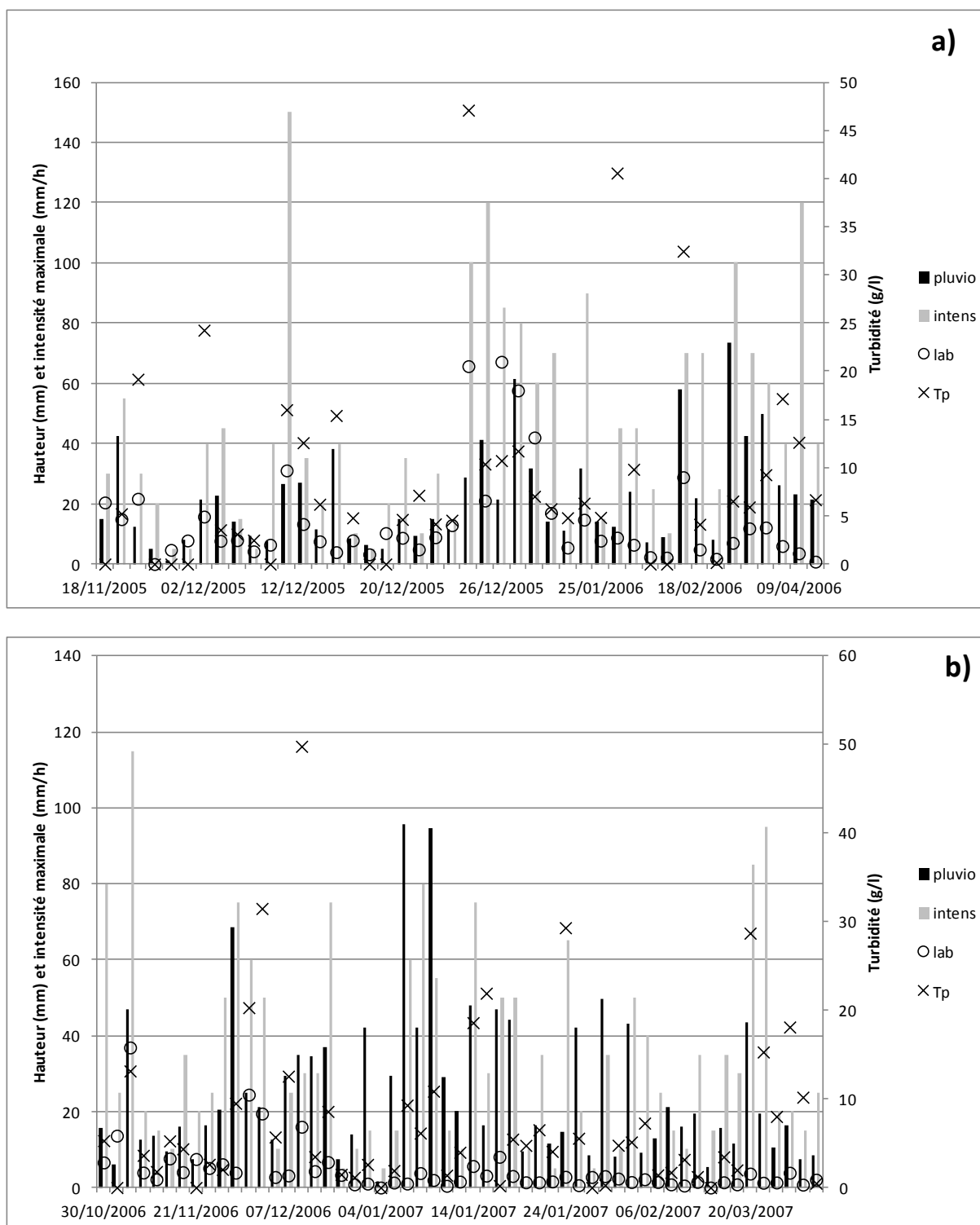


Figure 9 : Turbidité des ruissellements sur labour cultivé (moyenne S1 et S4) ou non (Tp) tout le long de la campagne a) 2005-06 en riz et b) 2006-07 en maïs + haricot

Infiltration : des mesures de l'infiltration de l'eau dans le sol par la méthode Beer Kan ont été effectuées à plusieurs périodes.

Dès les premières années, la vitesse d'infiltration de l'eau est supérieure dans les parcelles en SCV par rapport aux parcelles en labour (voir figure 10). Ces mesures ont été effectuées en pleine saison des pluies, sous maïs + haricot, sur 4 répétitions en décembre 2004 et 3

répétitions en janvier 2007. Les vitesses d'infiltration à saturation sont significativement supérieures sous SCV par rapport aux parcelles en labour, quelle que soit l'année des mesures.

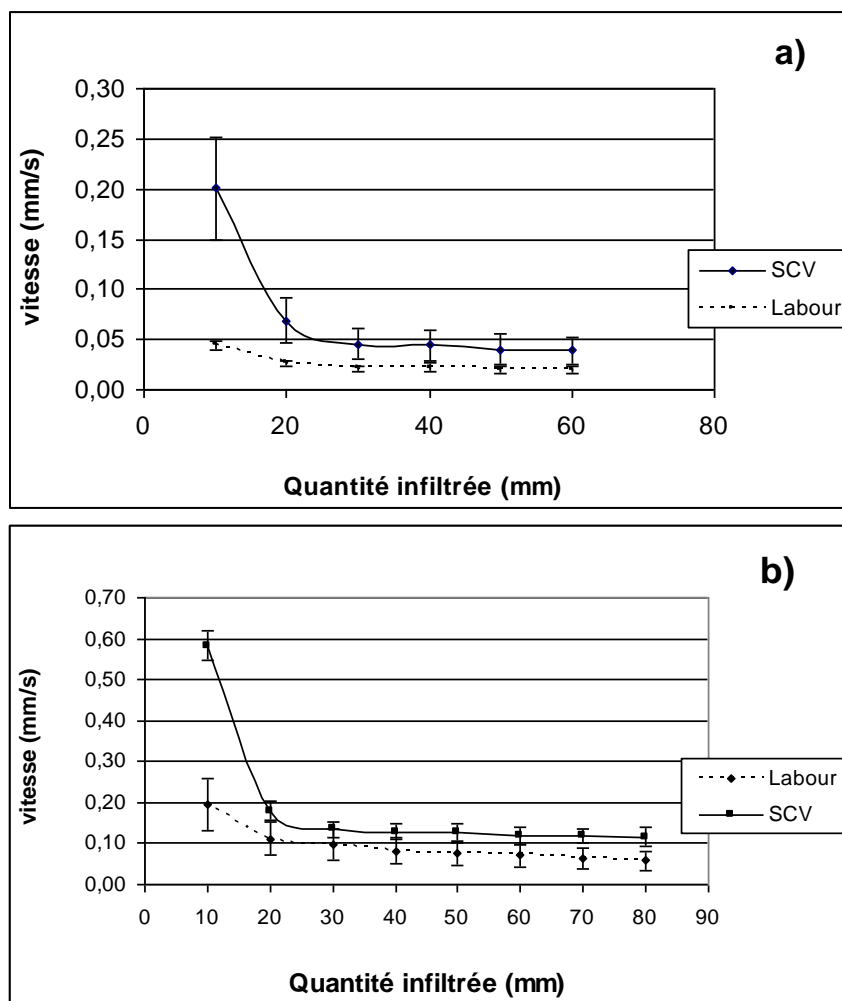


Figure 10 : Vitesse d'infiltration mesurée par la méthode Beerkan durant a) la 1^{ère} année et b) la 3^{ème} sur SCV vs labour, sous maïs + haricot

En septembre 2011, donc en fin de saison sèche (et avant les 1ères pluies), une campagne de mesures a été effectuée sur tous les lots, à raison de 2 répétitions dans la partie supérieure du lot et 2 dans la partie inférieure du lot : les résultats moyens des vitesses d'infiltration à saturation par système sont présentés dans la figure 11 a). Ils montrent des différences significatives sur les vitesses d'infiltration : la vitesse est supérieure dans les systèmes en SCV (en moyenne 0,28 mm.s⁻¹), non différents entre eux ; ensuite vient la vitesse d'infiltration dans les systèmes en labour (en moyenne 0,11 mm.s⁻¹), elle-même supérieure à la vitesse d'infiltration dans le témoin toujours propre (0,05 mm.s⁻¹). On peut noter également (figure 11 b) que la vitesse d'infiltration en SCV cultivés semble supérieure dans les parties inférieures des parcelles, alors qu'il ne semble pas y avoir de différence pour les parcelles en labour.

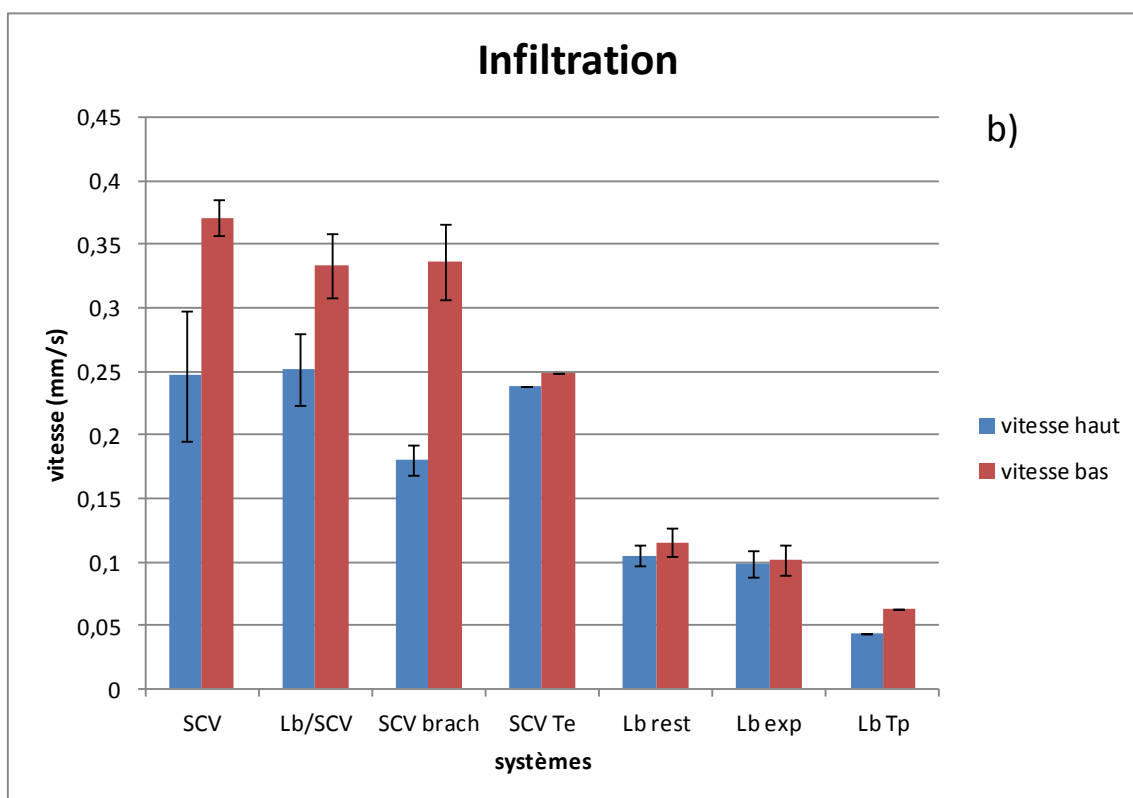
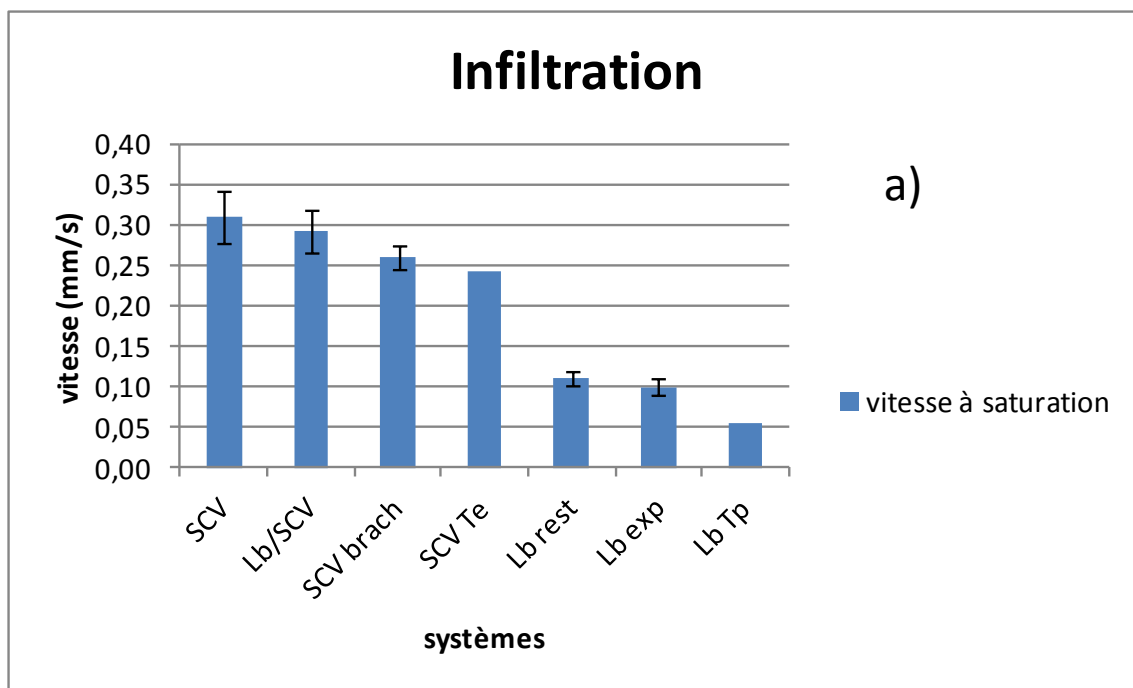


Figure 11 : Vitesses d'infiltration à saturation mesurées par la méthode Beerkan durant la dernière année d'études (saison sèche), a) selon les systèmes comparés et b) selon la position dans les parcelles. SCV = S3, Lb/SCV = S2, SCV brach = S5, SCV Te = Te, Lb rest = S4, Lb exp = S1, Lb Tp = Tp.

A l'occasion de ces mesures de vitesse d'infiltration, des mesures systématiques ont accompagné, permettant de mesurer les humidités initiales du sol et les densités apparentes dans l'horizon 0-5 cm. On note des différences significatives entre les systèmes, tant pour les densités que pour les humidités initiales du sol. Par contre, aucune différence entre haut et bas des parcelles n'apparaît.

Les **densités apparentes** du sol à l'horizon 0-5 cm sont significativement inférieures sous SCV (0,95) que sous labour (1,02) (voir figure 12 a) ; si on ne constate pas de différence entre les différents systèmes en labour, le témoin toujours enherbé ainsi que le système avec couverture vive de *brachiaria ruziziensis* semblent avoir des densités inférieures aux autres systèmes SCV suivis (voir figure 12 b).

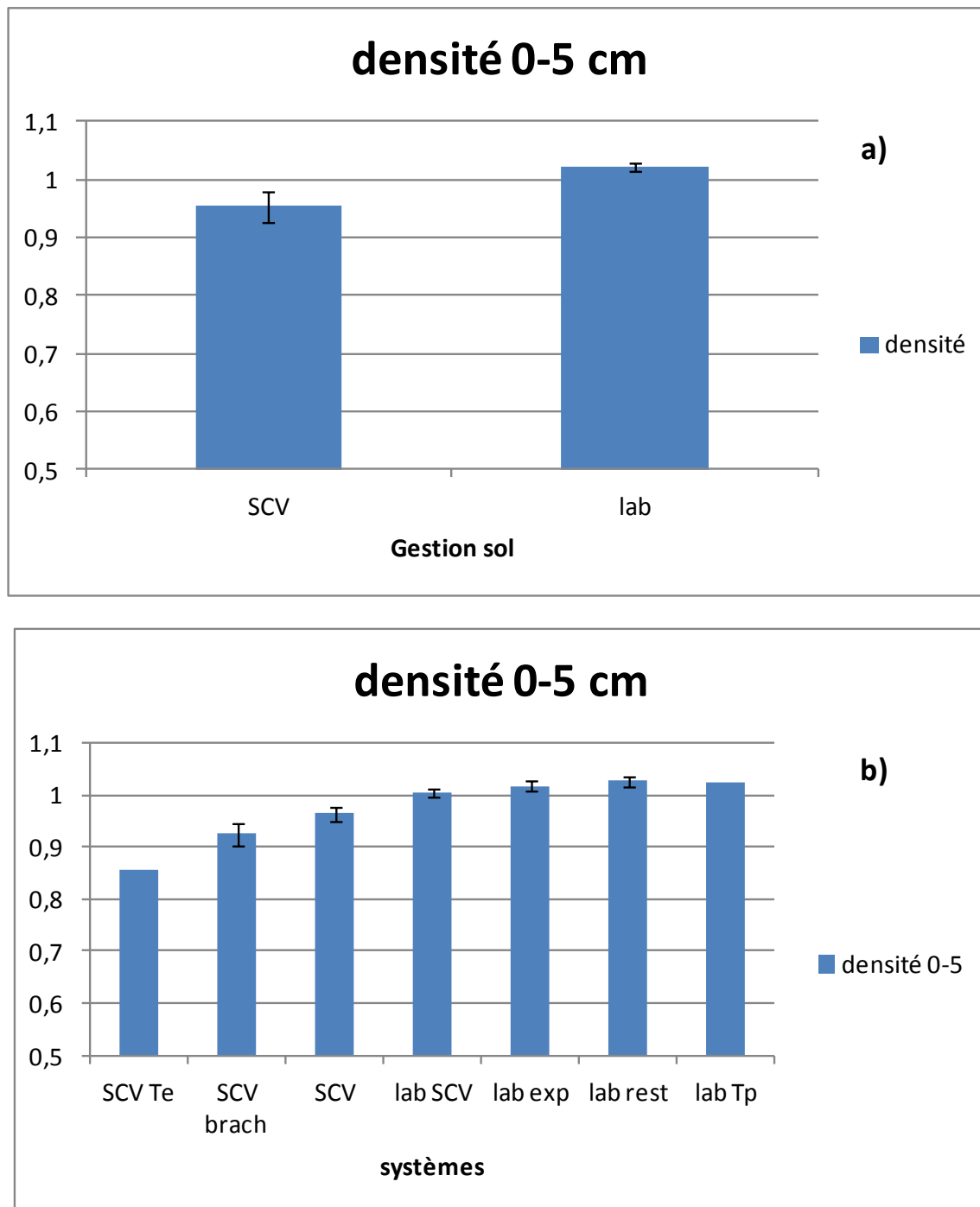


Figure 12 : Densités apparentes de l'horizon 0-5 cm, en septembre 2011, selon les a) gestions du sol et b) les différents systèmes comparés. SCV = S3, Lb/SCV = S2, SCV brach = S5, SCV Te = Te, Lb rest = S4, Lb exp = S1, Lb Tp = Tp.

De même, les **humidités initiales** sont différentes sous labour ou sous SCV : les sols restent significativement plus humides en saison sèche sous SCV (16,6 % en moyenne) que

sous labour (6,4 % en moyenne) (voir figure 13 a). La figure 13 b) montre que le système en SCV qui avait été préalablement labouré en 2004 est moins humide que les autres SCV, tandis que les parcelles en labour avec exportation sont plus sèches que celles sous labour avec restitution.

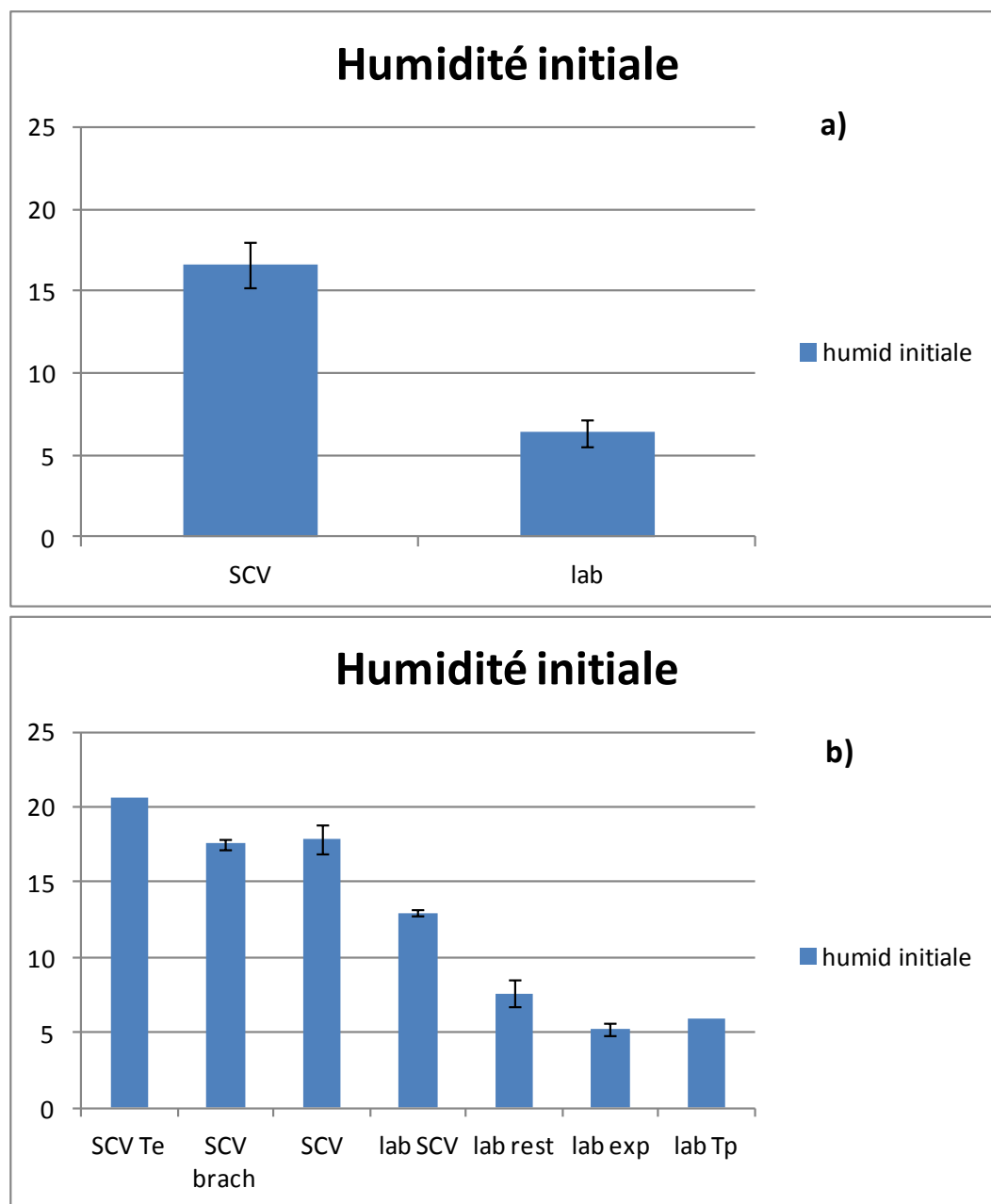


Figure 13 : Humidités pondérales (en %) de l'horizon 0-5 cm en septembre 2011 (saison sèche), a) moyennes selon les gestions du sol et b) moyennes par systèmes étudiés. SCV = S3, Lb/SCV = S2, SCV brach = S5, SCV Te = Te, Lb rest = S4, Lb exp = S1, Lb Tp = Tp.

Rendements :

Toutes les productions, grain et paille, ont été mesurées chaque campagne, sauf en 2006-07 la production de *brachiaria ruzisiensis*. Ces productions sont présentées dans les tableaux 10 et 11.

Tableau 10 : productions (kg/ha) totales grain et biomasses aériennes pour les campagnes avec maïs en association

système	campagne gestion	04-05				06-07				08-09					10-11				
		m gr	h gr	m pa	h pa	m gr	h gr	m pa	h pa	m gr	h gr	m pa	h pa	br pa	m gr	h gr	m pa	h pa	br pa
S1	Lb exp	2012	702	6247	372	1835	495	2821	875	2183	323	5412	482		3192	826	5077	225	
S2	Lb/SCV	1804	651	5936	332	1514	825	2459	561	2613	476	6344	701		3054	1037	3648	231	
S3	SCV	1301	1114	5435	369	1696	856	2518	881	2486	691	6568	833		3011	888	5879	259	
S4	Lb rest					2154	472	2791	1053	2437	421	5718	602		3083	949	4735	291	
S5	SCV brach					1318		2927		2053		4258		4450	2389		5367		4018

m : maïs ; h : haricot ; br : brachiaria ruziziensis ; gr : grain ; pa : paille

Tableau 11 : productions (kg/ha) totales grain et biomasses aériennes pour les campagnes avec riz pluvial

système	campagne gestion	05-06		07-08		09-10	
		r gr	r pa	r gr	r pa	r gr	r pa
S1	Lb exp	1466	3440	1471	6421	2996	3638
S2	Lb/SCV	1055	2181	1691	5229	2155	2229
S3	SCV	757	1452	1800	6632	3387	3747
S4	Lb rest	1261	2533	1572	4542	3824	4010
S5	SCV brach	287	563	1064	3275	1896	2075

r : riz ; gr : grain ; pa : paille

Les évolutions dans le temps (figures 14, 15) semblent montrer une augmentation des rendements grain, tant riz que maïs ; les rendements en SCV sont comparables aux rendements en labour ; seules les parcelles avec brachiaria présentent des rendements grain plus faibles, du fait de la compétition importante de cette plante pour l'azote et la lumière. Par contre, les parcelles avec brachiaria présentent les productions de biomasse aérienne les plus fortes les années où la culture principale est le maïs (figure 16).

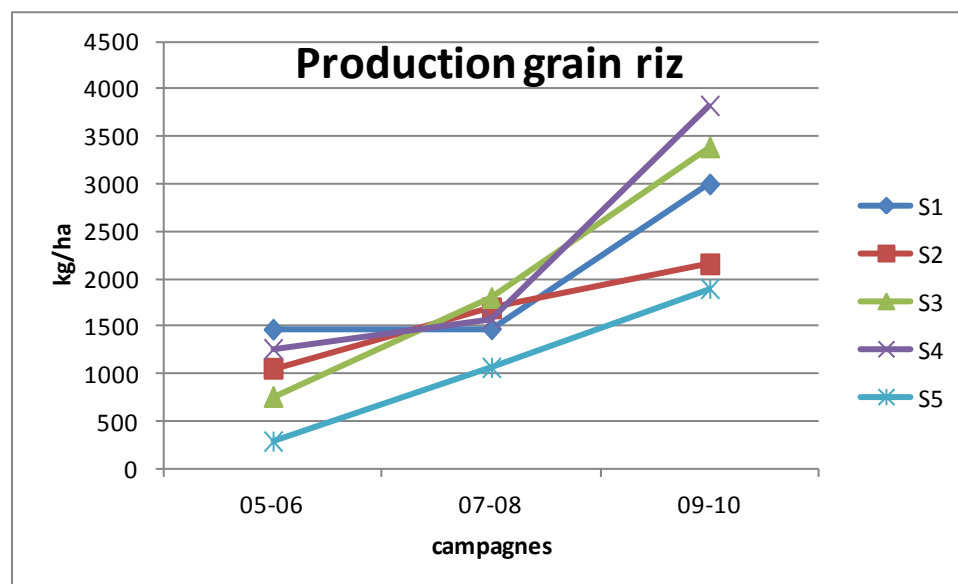


Figure 14 : rendements grain riz durant les 3 campagnes de culture

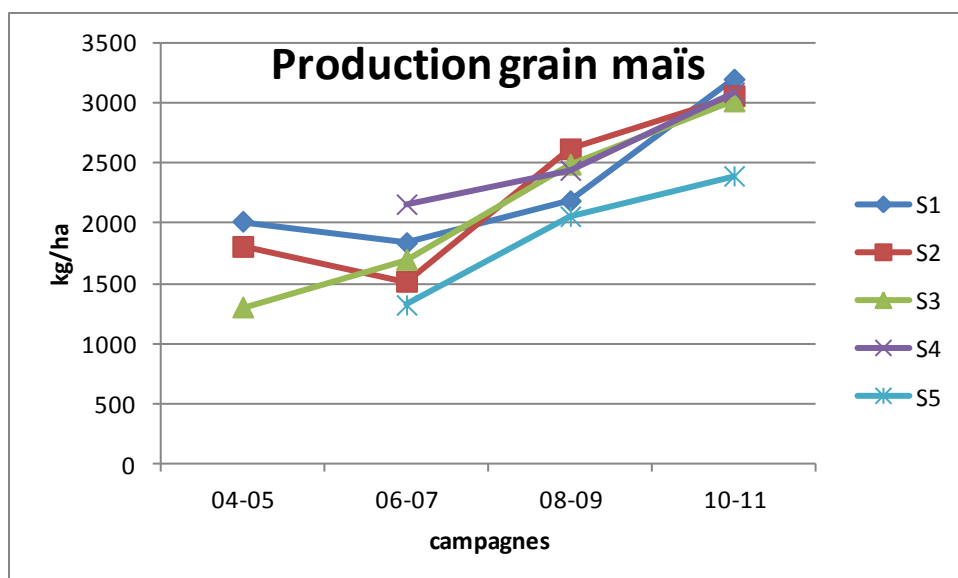


Figure 15 : rendements grain maïs durant les 4 campagnes de culture.

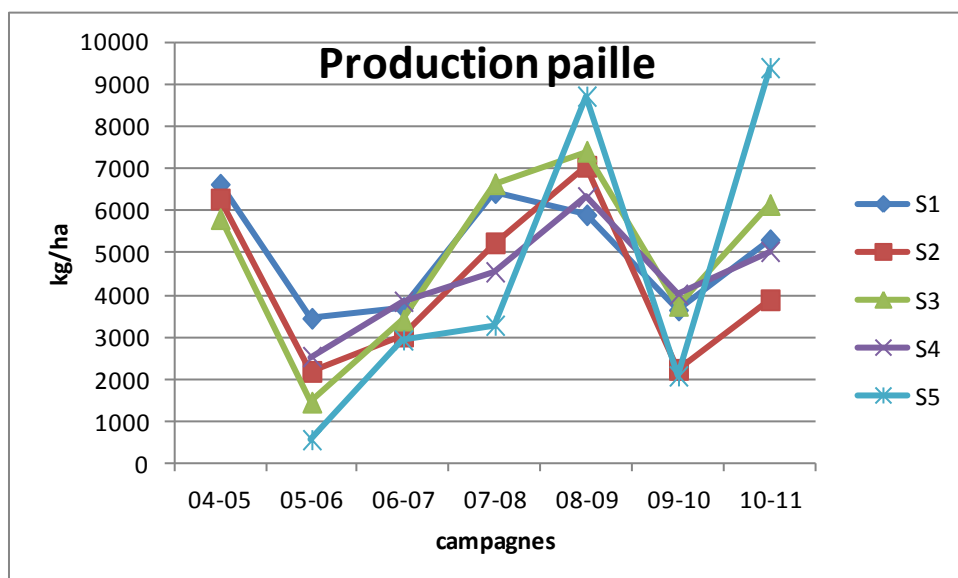


Figure 16 : rendements biomasse aérienne sèche totale pour les 7 campagnes considérées

Conclusion

Cette expérimentation confirme que, dans les conditions malgaches des Hautes Terres, les systèmes en SCV (systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale permanente) ont la faculté de diminuer significativement le ruissellement et les pertes en terre sur les tanety en culture pluviale. Si les coefficients de ruissellement restent dans tous les cas assez faibles (de 1 à 15 %), les réductions de ruissellement par les SCV vont néanmoins jusqu'à un facteur 10 par rapport au traitement labour. Par contre, la réduction des pertes en terre par ces systèmes est très importante, dès la première année. Du fait de la quasi suppression de l'érosion, les pertes en éléments minéraux sont très faibles et les stocks de C dans le sol ont tendance à augmenter avec les systèmes en SCV.

Ces effets sont dus en grande partie au recouvrement du sol par la couverture végétale, qui assure une protection de celui-ci contre la pluie. D'autres effets sont également à noter, sur la porosité des sols, leur densité ou la conservation d'une certaine humidité en saison sèche. Les rendements obtenus en SCV sont comparables à ceux obtenus en labour.

Cette expérimentation a servi de support aux stages de nombreux étudiants de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques de l'Université d'Antananarivo (ESSA), ainsi qu'à une thèse de la même Université.

Bibliographie

De Condappa D., 2000 - Illustration de la méthode de Beer-Kan" en vue de la caractérisation hydrodynamique d'un sol, Mémoire de DEA, Université Joseph Fourier Grenoble 1, LTHE-UMR5564, Grenoble, 49 p

Douzet J.-M., Scopel E., Muller B., Rakotoarisoa J., Albrecht A. et Razafindramanana N.C., 2010. Effets des systèmes de cultures en semis direct avec couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des cultures pluviales des Hautes Terres de Madagascar. *Étude et Gestion des Sols* 17 : 131-142.

FAO, 1998. ISRIC, ISSS World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report N°84, FAO, Rome.

Findeling A., 2001 - Etude et modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts, Montpellier.

Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A, 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences* 11: 1633-1644.

Rakotoalibera M. H., 2007. Quantification des ruissellements et des érosions sur les Hautes terres de Madagascar : comparaison de systèmes de culture en labour et en semis direct sur couverture végétale. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur Agronome de l'ESSA. Département Agriculture. *** pp.

Rakotoarisoa V., 2006. Quantification de ruissellement et érosion sur les Hautes Terres de Madagascar : comparaison de systèmes de culture en labour et en semis direct sur couverture végétale. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur Agronome de l'ESSA. Département Agriculture. 96 pp.

Rakotofiringa A., Tokarski Y., Penot E., 2007. Caractérisation des exploitations agricoles dans la commune rurale d'Andranomanelatra. Région Vakinankaratra, Madagascar. Document de travail n° 3, AFD. 42 pp.

Rakotonirainy T. R., 2007. Contribution a la protection de l'environnement contre la pollution par les nitrates : mesures de quelques indicateurs du bilan hydrique. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur en tourisme et environnement de l'Institut Supérieur Polytechnique de Madagascar. 92 pp.

Rasoloniaina M. B., 2005. Caractérisation des effets des différents systèmes de culture (semis direct sur couverture végétale et labour) sur la réduction du ruissellement et de l'érosion. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur Agronome de l'ESSA: Département Agriculture. 84 pp.

Razafimbelo T. M., Albrecht A., Basile I., Borschneck D., Bourgeon G., Feller C., Ferrer H., Michellon R., Moussa N., Muller B., Oliver R., Razanamparany C., Seguy L., et Swarc M., 2006 - Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale sur le stockage du carbone dans un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols* 13, pp. 113-127

Razafindramanana R. N. C., 2011. Contrôle des pertes en terre, en carbone et en nutriments par érosion sous systèmes en semis direct sur couverture végétale permanente des hautes-terres centrales malgaches. Thèse de l'École Supérieure des Sciences Agronomiques de l'Université d'Antananarivo pour obtenir le diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques. 181 pp.

Remamy R. R. N., 2005. Quantification des ruissellements et érosion sur défriche des Hautes Terres de Madagascar : labour et semis direct sur couverture végétale permanente. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur Agronome de l'ESSA: Département Agriculture. 56 pp.

Soil Survey Staff., 2003. Keys to Soil Taxonomy. Washington, USA, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.